



## **MEDICIÓN DE CÉLULAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA DE SILICIO AMORFO HIDROGENADO USANDO EL MÉTODO VIM**

**Alcides Muñoz Lasso**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología,  
Departamento de Física.

email: [alcides\\_up@yahoo.com](mailto:alcides_up@yahoo.com)

### **RESUMEN**

Se repasa el comportamiento de una célula solar de película delgada a través de un circuito equivalente. En este circuito se incluye un elemento que representa las pérdidas por recombinación en la célula. A partir del circuito equivalente damos la interpretación física de los parámetros característicos así como de las constantes que intervienen en el funcionamiento de una célula. De los resultados se utiliza el método VIM (Variable Illumination Measurement) de Merten, que permite la medición y análisis de los parámetros más significativos de una célula solar de una manera fácil y rápida. Por último se miden diferentes dispositivos *pin* de células solares de a-Si:H realizan una validación entre los resultados encontrados por el método VIM y su simulación por ordenador de acuerdo al modelo presentado.

### **PALABRAS CLAVES**

Silicio amorfo hidrogenado a-Si:H, modelo circuital, corriente de corto circuito  $I_{sc}$ , voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ , factor de forma FF, resistencia de circuito abierto  $R_{oc}$ , resistencia de corto circuito  $R_{sc}$ , método VIM.

### **ABSTRACT**

The behavior of thin film solar cells is reviewed by an equivalent circuit. In this circuit an element is included that represents lost by recombination cell. With the equivalent circuit obtained we give a physical interpretation of the characteristic parameters, as well as the constants taking part on the operation of a cell. The Merten's method VIM (Variable Illumination Measurement) is used, that allows us measurements and analysis of the more significant parameters of a solar cell in a likely and fast way. We measured different solar devices *pin* from a-Si:H cells in

order to compare the results found by the VIM method and their simulation by computer using the presented model.

## KEYWORDS

Amorphous silicio solar cells, the open-circuit voltage  $V_{oc}$ , the short-circuit current  $I_{sc}$ , Fill factor FF, the open-circuit resistance  $R_{oc}$ , the short-circuit resistance  $R_s$ , the VIM method.

## INTRODUCCIÓN

La curva característica  $I(V)$  de una célula solar puede ser descrita mediante el circuito equivalente de la figura 1 (líneas continuas).

Los parámetros característicos de una célula solar  $V_{oc}$ , FF,  $R_{oc}$  y  $R_{sc}$  se obtienen a partir de los valores ideales de la curva  $I(V)$ . Pero la existencia de algunos factores de pérdida (corrientes de recombinación) tales como corrientes de fuga laterales a lo largo de la capa-n, los "pinholes" y la suposición de que la corriente fotogenerada es independiente del voltaje, hace que los resultados experimentales no concuerden del todo con los que se obtienen de la curva  $I(V)$  para una célula solar. La principal diferencia de aplicar este modelo a las células de silicio amorfo es suponer que la fotocorriente  $I_{ph}$  colectada en la célula es independiente del voltaje aplicado. Como la longitud de

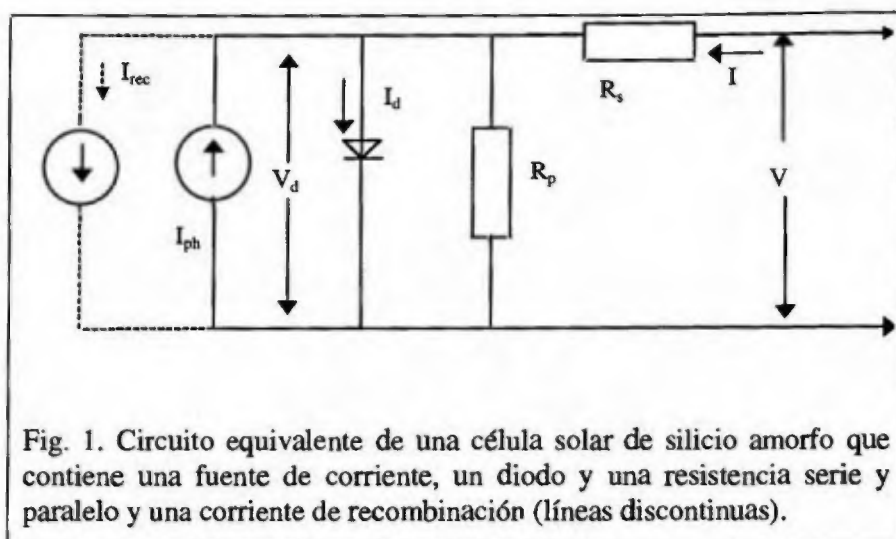


Fig. 1. Circuito equivalente de una célula solar de silicio amorfo que contiene una fuente de corriente, un diodo y una resistencia serie y paralelo y una corriente de recombinación (líneas discontinuas).

en la célula es independiente del voltaje aplicado. Como la longitud de difusión es pequeña en el silicio amorfo, los portadores son colectados por un campo eléctrico. Cuando el campo eléctrico es débil, los portadores tienen pérdidas por recombinación. Así la fotogeneración de corriente viene a ser dependiente del campo y el ajuste de las curvas  $I(V)$  de células solares de silicio amorfo no concuerdan del todo con los resultados experimentales tal como el valor del factor de forma y la resistencia de corto circuito (Muñoz Lasso 2003). Al incluir el término de corrientes de pérdida (Merten 1996) en la ecuación de corriente-voltaje, representado por el elemento conectado por líneas discontinuas de la figura 1, se obtiene una mejor concordancia con los resultados experimentales de la variación de la radiación de la curva  $I(V)$  para las células de silicio amorfo (Merten, J., et al., 1998).

### Parámetros Característicos de las Células Solares

Las células solares pueden caracterizarse funcionalmente a partir de la curva, corriente-vs-voltaje  $I(V)$ , figura 2. La respuesta  $I(V)$  queda definida básicamente por siete parámetros a saber: tensión en circuito abierto  $V_{oc}$ , corriente en cortocircuito  $I_{sc}$ , factor de forma  $FF$ ; eficiencia  $\eta$ , punto de potencia máxima  $V_{mp}, I_{mp}$  ( $P_{mp} = V_{mp}I_{mp}$ ) y pendiente a cortar los ejes,  $R_{sc}$  y  $R_{oc}$  (Möller, 1993).

El voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  se define por la condición

$$I(V_{oc}) = 0 \quad (1)$$

Este es el voltaje de la célula cuando no fluye corriente. Otro parámetro es la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$

$$I_{sc} = |I(V = 0)| \quad (2)$$

Es la corriente de la célula sin caída de voltaje en sus terminales. La corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  para efectos prácticos puede considerarse proporcional a la luz absorbida en la célula (Merten, J. 1996).

Otro parámetro es el factor de forma (*Fill Factor*)  $FF$  que describe la desviación de la curva  $I(V)$  de la forma rectangular:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3)$$

La eficiencia  $\eta$  de una célula es:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_o} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_o} \quad (4)$$

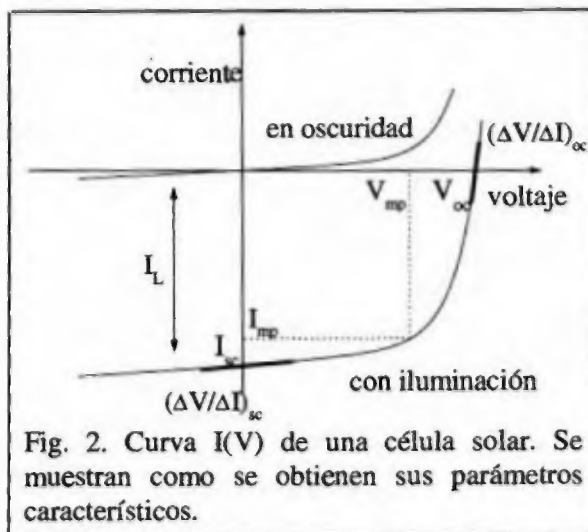


Fig. 2. Curva  $I(V)$  de una célula solar. Se muestran como se obtienen sus parámetros característicos.

Donde  $P_{mp}$  es la potencia máxima que provee la célula y  $P_o$  es la radiación incidente en la célula. Los dos parámetros  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$  son importantes para el diseñador de generadores solares ya que las cargas conectadas a los paneles solares deben adaptarse, en impedancia, para permitir que trabajen en el punto de potencia máxima  $P_{mp}$ :

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (5)$$

Los dos últimos parámetros característicos se refieren a la pendiente inversa de la curva  $I(V)$  en condiciones de corto circuito y circuito abierto:

$$R_{sc} = \left( \frac{\partial V}{\partial I} \right)_{sc} \quad (6)$$

$$R_{oc} = \left( \frac{\partial V}{\partial I} \right)_{oc} \quad (7)$$

## PARTE EXPERIMENTAL

Se hicieron medidas de  $I(V)$  variando la irradiancia en varios órdenes de magnitud. El sistema experimental utilizado es el que se muestra en la figura 3. Consiste de una fuente de luz que en este caso es una lámpara halógena conectada a una fuente de 12 V. La temperatura de las células durante las medidas estuvo controlada por un flujo de aire caliente el cual estaba regulado por un controlador de temperatura. El programa del ordenador envía los valores de la tensión a la fuente y determina los valores de la intensidad a partir de la lectura del voltímetro conectado al amplificador de corriente. Las medidas son almacenadas en el ordenador para su posterior utilización. Las variaciones de irradiancia se obtienen cambiando la distancia entre la lámpara y la muestra. Asumiendo que la corriente de corto circuito  $I_{sc}$  es proporcional a la luz absorbida, se puede considerar como una medida de los niveles de iluminación. Para entender este comportamiento, se determinan los parámetros de las curvas de  $I(V)$  para cada uno de los niveles de iluminación, usando un programa de tratamiento de datos (Merten 1996) el cual calcula los parámetros característicos. Los datos resultantes de  $V_{oc}$ , FF,  $R_{sc}$ ,  $R_{oc}$  son presentados como una función de los niveles de iluminación, el cual se asume proporcional a la corriente de corto circuito  $I_{sc}$  del dispositivo.

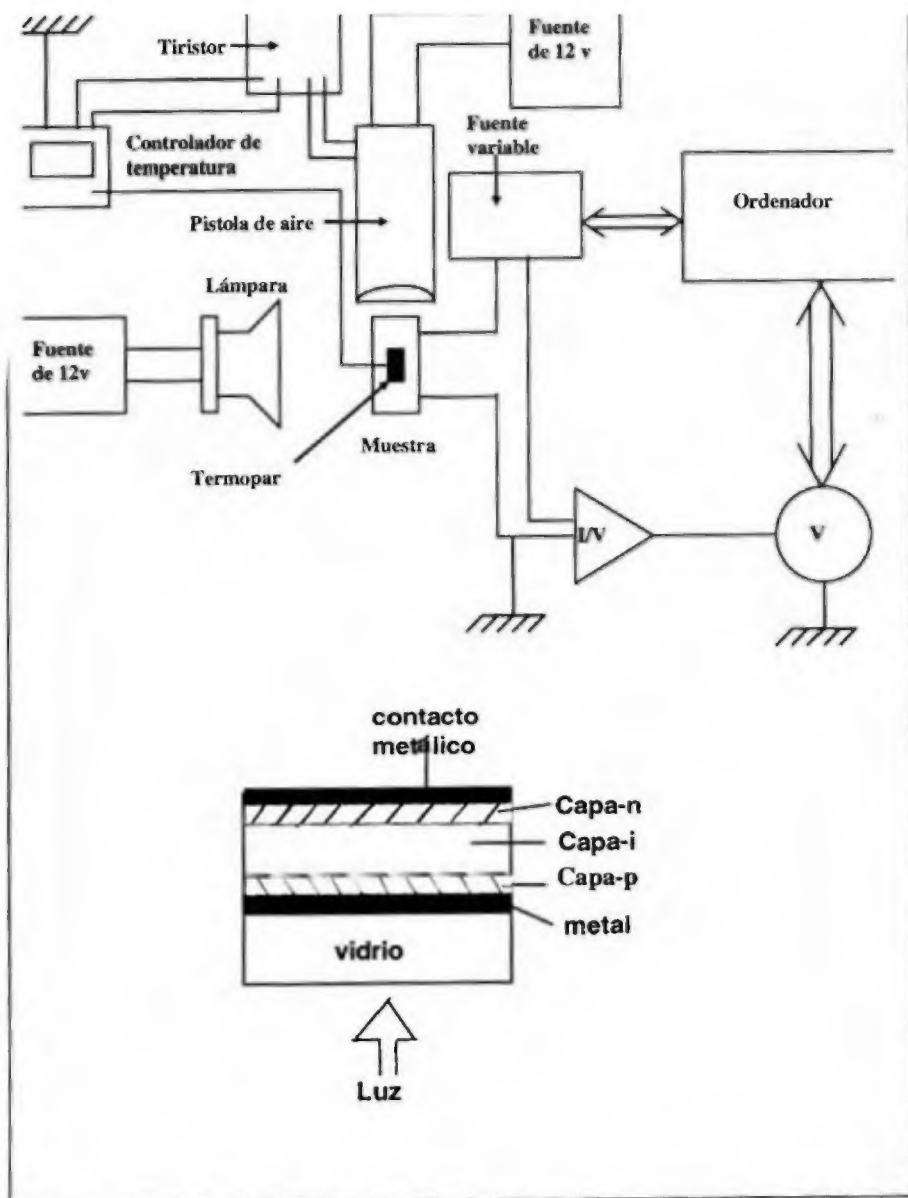


Fig. 3. Esquema experimental utilizado para obtener las medidas de la variación de la irradiancia y temperatura. Además, se muestra la estructura, pin de las células solares a-Si:H estudiadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales que se presentan, a continuación, se comparan con las predicciones del modelo físico propuesto. Se miden células solares de silicio amorfo de diferente grosor de la capa intrínseca y células solares a diferentes regímenes de temperatura donde se estudia el efecto de la temperatura en el comportamiento de las células.

### **Células solares de silicio amorfo con diferentes grosores de la capa-i.**

Se han variado los niveles de iluminación para las células solares de a-Si:H de grosores de la capa-i diferentes, los resultados son los que se presentan a continuación.

Las gráficas del  $V_{oc}(I_{sc})$ , figura 4a, presentan un comportamiento un tanto similar a alta iluminación, resultando las más delgadas con un valor ligeramente mayor de  $V_{oc}$ . El menor valor del  $V_{oc}$  a baja iluminación para las células más delgadas en la capa-i, está relacionado con un menor valor de  $R_p$ . La disminución de los valores del factor de idealidad  $n$ , con el aumento del grosor son los responsables de que el valor del  $V_{oc}$  disminuya, aunque la corriente de recombinación  $I_0$  disminuye con el grosor, (Tabla 1), sus valores no son suficientes para aumentar el  $V_{oc}$  (Shah A.V. et al., 1995).

Los valores de FF, figura 4b, para las células con grosores diferentes en la zona-i, presentan comportamientos diferentes. Las células menos gruesas tienen un menor valor en casi todo el intervalo de iluminación. En la zona donde domina la resistencia paralelo (bajo nivel de iluminación) los valores del factor de forma FF, para las células más delgadas, son mucho menores; esto puede deberse a un menor valor de la resistencia paralelo causada por corrientes de fuga laterales a través de los bordes de la unión o a la presencia de pinholes por lo delgada de la zona-i. A niveles altos de iluminación, donde domina la resistencia serie, los comportamientos de las células son parecidos (Hubin, J. & Shah, A.V. 1995).



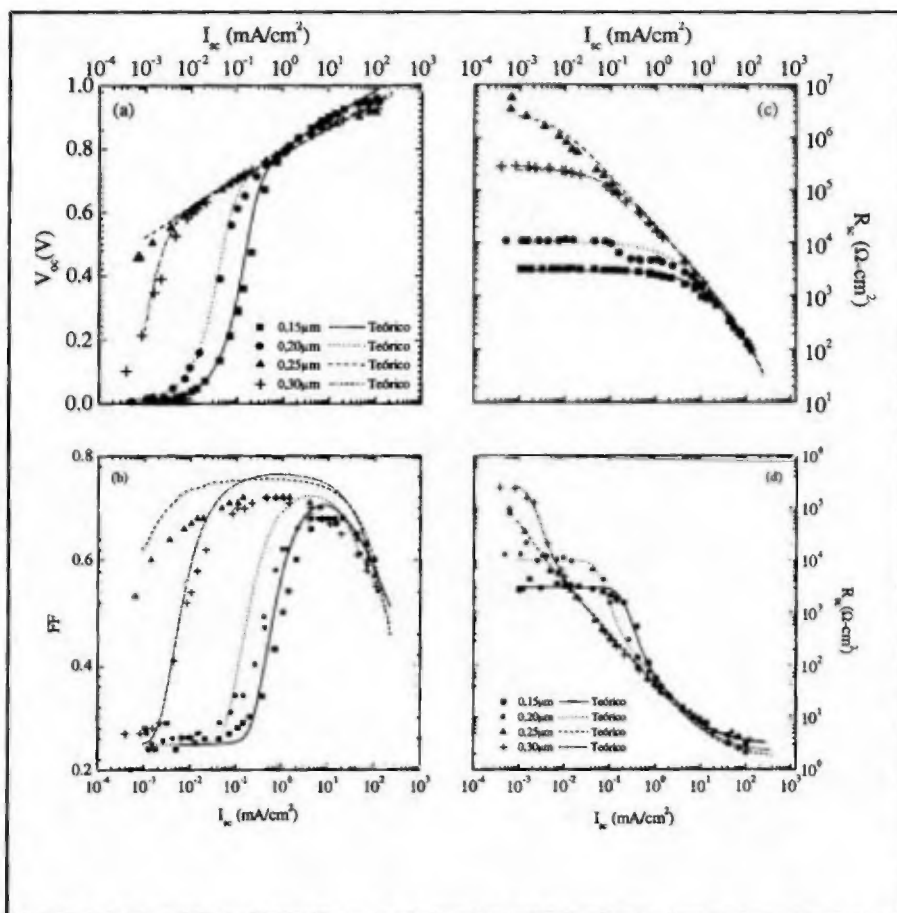


Fig. 4. Valores experimentales obtenidos a partir de las curvas de  $I(V)$  a diferentes niveles de iluminación, por el método VIM y ajuste por ordenador del modelo propuesto.

Las gráficas de  $R_{sc}(I_{sc})$ , figura 4c, a bajos niveles de iluminación señalan el valor de  $R_p$  en donde las más delgadas tienen valores menores (Tabla 1) el cual afecta significativamente el FF tal como se observa en la gráfica de  $FF(I_{sc})$ . Este menor valor de  $R_p$  se puede deber a corrientes de fuga laterales en la unión, como a la presencia de defectos en la capa-i (*pinholes*). Los valores del producto de  $\mu\tau$ , obtenidos en la zona media de iluminación, aumentan con el grosor y están relacionados con un aumento de la recombinación en la zona i, esto igualmente explica los menores valores de FF, (Tabla 1), (Shah, A.V., et al., 1995).



Tabla 1. Parámetros calculados para muestras con diferente grosor en la capa-i.

<i>grosor capa-i</i> (Å)	$R_s$ ( $\Omega\text{-cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega\text{-cm}^2$ )	$\mu\tau$ ( $\text{cm}^2/\text{V}$ )	$n$	$I_o$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )
1 500	3,5	3 265	$4,85 \times 10^{-9}$	1,50	$1,38 \times 10^{-9}$
2 000	3,0	$1,1 \times 10^4$	$8,55 \times 10^{-9}$	1,48	$1,10 \times 10^{-9}$
	1,5	$5,0 \times 10^6$	$14,1 \times 10^{-9}$	1,41	$5,41 \times 10^{-10}$
3 000	2,2	$3,0 \times 10^5$	$20,8 \times 10^{-9}$	1,32	$1,21 \times 10^{-10}$

En la figura 4d, mostramos las gráficas de  $R_{sc}(I_{sc})$ . Las gráficas presentan una saturación en la región de alta iluminación por lo que podemos obtener el valor de la resistencia serie, las células más delgadas presentan mayor valor de resistencia serie, la misma puede deberse a la resistencia entre los contactos metálicos y la célula.

#### **Variación de la Temperatura en una muestra de a-Si:H.**

Como se ha visto en el apartado anterior, el modelo propuesto ajusta de modo aceptable los resultados experimentales del método VIM. A continuación presentamos los resultados del estudio de la dependencia con la temperatura de una célula de a-Si:H y los parámetros de ajuste para posteriormente analizar la información obtenida. Sus resultados se muestran en la figura 4.

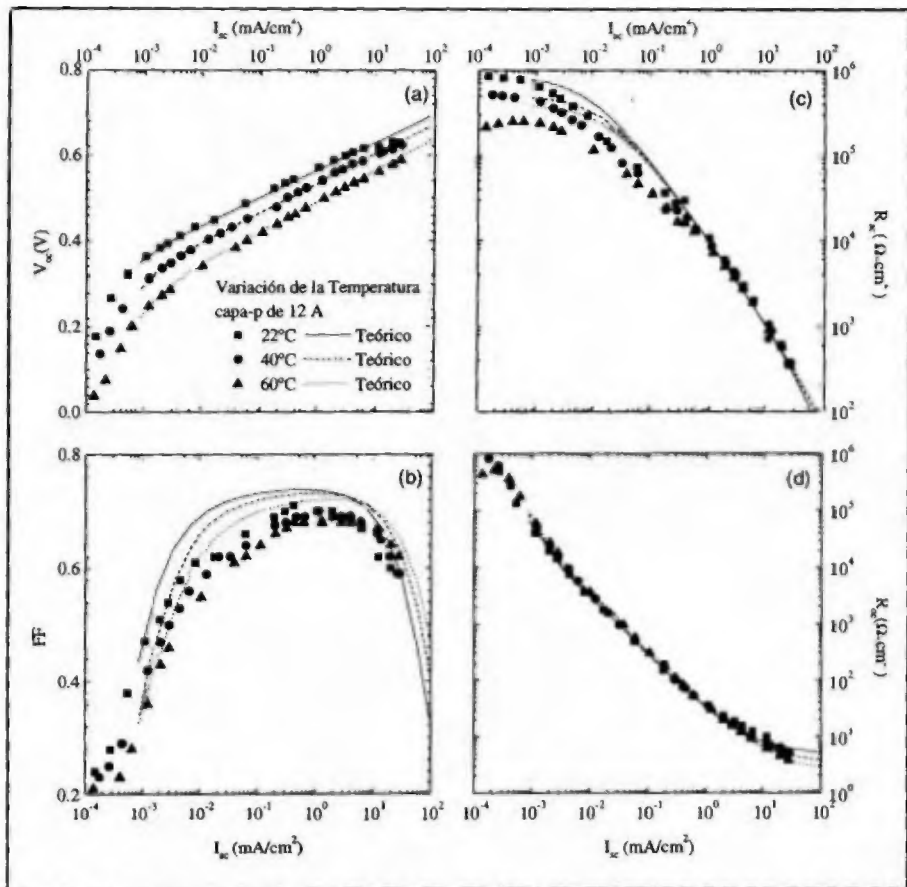


Fig. 5. Representación de los valores experimentales obtenidos a través del método VIM y generación por ordenador de los valores de acuerdo al modelo propuesto. Se observa una buena concordancia entre los valores experimentales y teóricos.

Los valores de  $V_{oc}$ , figura 5a, en la célula solar presentan una disminución con la temperatura, la disminución a menor iluminación nos indica un menor valor de la resistencia paralelo con la temperatura. El valor del factor de idealidad  $n$  aumenta con la temperatura en la célula solar, esto muestra el aumento de la recombinación en la célula producto del aumento de la temperatura. El valor de la corriente de saturación  $I_0$  aumenta con la temperatura, el mismo está relacionado con la disminución del valor de  $V_{oc}$ , (Tabla 2). (Vieira, M. et al., 1996; Yang, L. et al., 1991).

Los valores del factor de forma FF, figura 5b, no presentan una disminución con el aumento de la temperatura, disminución que podríamos esperar por su menor valor del  $V_{oc}$ . Esto indica que el valor del producto  $\mu\tau$  no se ve afectado con la temperatura en la célula solar amorfa y, por tanto, no produce un aumento en la recombinación en la zona-i, (Tabla 2). A niveles altos de iluminación la célula a mayor temperatura muestra mayores valores del FF, pero el mismo no podemos atribuirlo a un aumento de la temperatura (Vieira, M. et al., 1996).

Tabla 2. Células Solares de a-Si:H, Variación con la Temperatura.

Temp. (°C)	$n$	$I_0$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$\mu\tau$ (cm <sup>2</sup> /V)	$R_p$ ( $\Omega$ -cm <sup>2</sup> )	$R_s$ ( $\Omega$ -cm <sup>2</sup> )
22	1,49	$2,30 \times 10^{-8}$	$2,78 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^5$	3,5
40	1,73	$2,30 \times 10^{-7}$	$2,78 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^5$	3,0
60	1,95	$5,75 \times 10^{-6}$	$2,73 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^5$	3,0

La gráfica de  $R_{sc}(I_{sc})$ , figura 5c, presenta una disminución de la resistencia paralelo al aumentar la temperatura, lo cual concuerda con el comportamiento observado en la gráfica de  $V_{oc}(I_{sc})$ ; podemos suponer que la temperatura activa los defectos puntuales, produciéndose corrientes laterales en la misma. El valor del producto no muestra un cambio apreciable con la temperatura, este comportamiento lo podemos atribuir a que tanto la movilidad  $\mu$ , como el tiempo de vida  $\tau$ , de los portadores son dependientes de la temperatura uno disminuyendo y otro aumentando respectivamente por lo que su producto permanece casi constante.

En la gráfica de  $R_{oc}(I_{sc})$ , figura 5d, se obtiene el valor de la resistencia serie extrapolando en la zona de alta iluminación. Los valores obtenidos de la resistencia serie muestran una leve variación con la temperatura, en concordancia con el comportamiento de la gráfica de  $FF(I_{sc})$ , (Tabla 2), (Carlson, D. E. & K. Rajan. 1996).

Los cambios que presenta la célula con la temperatura guardan concordancia con lo esperado y la predicción de la disminución de sus propiedades con la temperatura. En general, los cambios con la temperatura, nos han indicado un aumento de la recombinación en volumen y una variación del campo eléctrico en la interfaz p/i, tal como lo indica la disminución del  $V_{oc}$  con la temperatura. Los cambios en la resistencia paralelo y serie están relacionados con la degradación de la célula. Estas variaciones indican una disminución de sus características electrónicas con la temperatura.

## CONCLUSIONES

El modelo propuesto, usando el método VIM, permite diferenciar las características que presentan las células solares *pin* a través de sus parámetros característicos, así como las limitaciones que presenta el dispositivo. La utilización de esta técnica es una manera rápida y fácil de estudiar el comportamiento de las células solares.

Para las muestras de diferentes grosores en la zona-i, el valor del producto  $\mu\tau$  mejora con el grosor. Esto indica que el valor del producto  $\mu\tau$  involucrado en el modelo es un producto  $\mu\tau$  funcional o efectivo que viene determinado no sólo por el material, sino también por la estructura del dispositivo. En las células más delgadas puede pesar más la interfaz donde los defectos cargados capturan más eficientemente.

El análisis en temperatura de los dispositivos *pin* de silicio amorfo muestra cómo el parámetro que más se ve afectado es el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ . Este efecto está directamente relacionado con la activación térmica de la corriente de saturación en inverso del dispositivo. El resto de los parámetros del modelo, incluido el producto  $\mu\tau$ , apenas cambian.

## REFERENCIAS

Hubin, J. & A.V. Shah. 1995., Effect of recombination function on the collection in a p-i-n solar cell, Philos. Mag. B;72(2) 589-599.

Merten, J. 1996. Photovoltaics with Amorphous Silicon: Technological, Physical and Technical Aspects. *Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, España.*

Möller, H. J. 1993. Semiconductors for Solar Cell, The Artech House. 587 pp.

Merten, J., J.M. Asensi, C. Voz, , A. Shah, R. Platz & J. Andreu. 1998, Improved Equivalent Circuit and Analytical Model for Amorphous Silicon Solar Cells and Modules. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45(2) 423-429.

Muñoz Lasso, A. 2003. Modelo circuital de células solares de película delgada. *Tecnociencia*, Vol. 5(1) 33-50.

Shah, A.V., R. Platz & H. Keppner. 1995. Thin-Film silicon solar cells; A review and select trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 38 501-520.

Vieira, M., E. Fortunato, G. Lavareda, C. N. Carvalho & R. Martins. 1996, Light and temperature effect on pin a-Si:H device performance. *Vacuum*, 45 (10/11) 1147-1149.

Yang, L., L. Chen & A. Catalano. 1991., Intensiva and temperature dependence of photodegradation of amorphous silicon solar cells under intense illumination. *Appl. Phys. Lett.*, 59 840-842.

Carlson, D.E. & K. Răjan. 1996. Irreversible light-enhanced degradation in amorphous silicon solar cells at elevated temperatures. *Applied Physics Letter*, 68(1), 28-30.

*Recibido marzo de 2005, aceptado agosto de 2005.*

